

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

621.311(07)
П991

В.В. Пястолов, А.В. Хлопова

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие к курсовому проектированию

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2017

УДК 621.311(076.5) + 621.316.9(076.5)
П991

*Одобрено
учебно-методической комиссией энергетического факультета*

Рецензенты: А.В. Белов, В.Я. Боос

П991 **Переходные процессы в системах электроснабжения:** учебное пособие к курсовому проектированию / В.В. Пястолов, А.В. Хлопова. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 25 с.

Учебное пособие включает в себя программу второй части курса, задание, исходные данные и указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Переходные процессы в системах электроснабжения» предусмотренной учебным планом подготовки бакалавров техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Пособие предназначено для студентов очной и заочной формы обучения.

Курсовая работа «Исследование статической и динамической устойчивости простейшей электроэнергетической системы» включает в себя 6 пунктов, охватывающих все разделы второй части курса.

УДК 621.311(076.5) + 621.316.9(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2017

ПРОГРАММА КУРСА

1. Общие сведения об устойчивости электрических систем.

Сущность проблемы устойчивости. Статическая устойчивость. Динамическая устойчивость. Простейшая оценка статической устойчивости. Критерий статической устойчивости. Простейшая оценка динамической устойчивости. Задача динамической устойчивости.

2. Основные характеристики системы.

Характеристика мощности простейшей электрической системы.

Характеристика мощности электрической системы в общем случае (сложные системы с поперечными связями). Эквивалентные постоянные системы (постоянные эквивалентного четырехполюсника). Круговые диаграммы мощностей. Характеристики мощности начала и конца передачи. Влияние параметров схемы на характеристики мощности. Векторные диаграммы, статические и динамические характеристики мощности при наличии у генераторов АРВ пропорционального и сильного действия.

3. Уравнение движения ротора и его запись в системе относительных единиц.

Время, скорость, мощность и вращающий момент, ускорение в системе относительных единиц. Уравнение движения ротора при отсутствии и наличии демпферного момента.

4. Статическая устойчивость нерегулируемой электроэнергетической системы.

Замена исходных уравнений линеаризованными. Анализ устойчивости нерегулируемой системы без учёта электромагнитных процессов в контурах ротора без учёта и с учётом демпферного момента. Условия устойчивости электрических систем. Правило Ляпунова.

5. Динамическая устойчивость.

Основные допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора. Способ площадей и вытекающий из него критерий динамической устойчивости. Определение предельного угла отключения при коротком замыкании. Способ площадей при анализе действия АПВ. Метод последовательных интервалов. Правило площадей и метод последовательных интервалов в случае двух станций соизмеримой мощности.

6. Устойчивость нагрузки.

Устойчивость асинхронного двигателя. Статические характеристики нагрузки. Вторичные признаки устойчивости.

7. Действительный предел передаваемой мощности.

Влияние мощности приёмной системы на амплитуду характеристики мощности. Определение действительного предела передаваемой мощности.

ЗАДАНИЕ

к курсовой работе «Исследование статической и динамической устойчивости простейшей электроэнергетической системы»

Генераторная станция работает на шины бесконечной мощности через две параллельные воздушные линии электропередачи и передаёт мощность P_2 при $\cos\varphi = 0,85$ (Рис. 1). Напряжение на шинах приёмной системы поддерживается неизменным, равным U_2 .

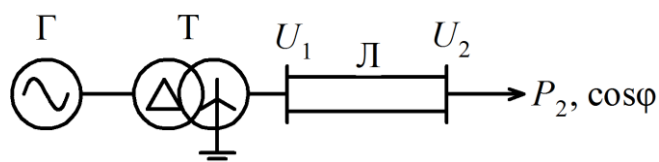


Рис. 1

Требуется:

1. Используя постоянные четырехполюсника, построить круговую диаграмму и угловые характеристики начала и конца передачи при условии отсутствия у генераторов автоматического регулирования напряжения (АРН) ($E_q = \text{const}$). Учесть все индуктивности схемы, активное сопротивление линий передач, а также ветвь намагничивания эквивалентного трансформатора и ёмкостную проводимость линий.

2. Построить угловые характеристики передачи при условии:

- отсутствия у генератора АРН ($E_q = \text{const}$);
- наличия у генераторов АРН пропорционального действия ($E'_q = \text{const}$);
- наличия у генераторов АРН сильного действия ($U_{Гq} = \text{const}$).

Построить векторную диаграмму передачи, на которой отобразить \dot{U}_2 , \dot{E}_q , \dot{E}' , \dot{E}'_q , $\dot{U}_Г$, $\dot{U}_{Гq}$. В этом пункте допускается пренебречь ветвью намагничивания трансформатора и активными сопротивлениями.

3. Определить пределы передаваемой мощности и коэффициенты запаса статической устойчивости системы для случаев, упомянутых в пунктах 1 и 2.

4. Выявить влияние коэффициента мощности нагрузки в пределах от $\cos\varphi = 0,6$ (ёмкостная нагрузка) до $\cos\varphi = 0,6$ (индуктивная нагрузка) на коэффициент запаса статической устойчивости. Расчёты провести для генераторов без АРН. Учесть все индуктивности схемы, и ёмкостную проводимость линий.

5. Проверить статическую устойчивость системы без учёта действия АРН, для чего получить и построить зависимости изменения угла δ во времени. При этом в качестве малого возмущения рассмотреть отклонение ротора на один градус от положения установившегося режима $\delta_{уст.}$ ($\delta_{уст.} = 0^\circ, \delta_0, 80^\circ, \delta_{тр} < \delta < 90^\circ, 115^\circ$). Расчёты провести для двух случаев: без учёта демпферного момента, с учётом демпферного момента. В данном пункте допускается

пренебречь ветвью намагничивания трансформатора и активными сопротивлениями.

6. Провести расчёт динамической устойчивости системы при наличии у генераторов АРН пропорционального действия с определением предельного угла и предельного времени отключения аварии при двухфазном КЗ на землю одной из параллельных линий вблизи шин генераторной станции. При выполнении расчётов пренебречь ветвью намагничивания трансформатора и активными сопротивлениями.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Всего приведено сто вариантов. Номинальный коэффициент мощности для генераторов во всех вариантах можно полагать равным $\cos\varphi_H = 0,85$. Для машин с номинальной мощностью $P_{HG} = 500$ МВт принимать $x_d = 2,41$, $x'_d = 0,4$, для машин мощностью $P_{HG} = 300$ МВт – $x_d = 2$, $x'_d = 0,3$.

Трансформаторы, работающие в блоке с генераторами, имеют мощность 630 МВА, если мощность машины 500 МВт и мощность 400 МВА, если мощность генератора – 300 МВт. Для трансформаторов мощностью 630 МВА следует принять $I_\mu = 1\%$, $U_k = 12,5\%$, а для трансформаторов мощностью 400 МВА – $I_\mu = 2\%$, $U_k = 10,5\%$. Активными потерями можно пренебречь.

Величина демпферного момента для генераторов всех типов может быть принята равной $P_d = 30$ о.е. Остальные данные занесены в таблицу 1.

Таблица 1

Вариант	U_2 , кВ	P_2 , МВт	L , км	P_G , МВт	T_j , с
1	335	536	480	2 x 500	8,0
2	490	750	600	3 x 500	7,5
3	240	330	340	2 x 300	9,0
4	235	290	260	500	7,0
5	360	600	450	3 x 300	9,0
6	500	900	550	3 x 500	6,5
7	214	200	210	2 x 300	8,5
8	330	500	400	3 x 300	8,6
9	305	525	360	2 x 500	5,6
10	320	560	480	3 x 300	6,8
11	240	330	345	2 x 500	5,5
12	330	530	530	2 x 500	5,0
13	250	320	480	3 x 300	9,5
14	326	450	313	3 x 300	6,0
15	353	700	290	3 x 500	7,0
16	331	530	570	4 x 300	7,9
17	306	490	430	2 x 500	8,5
18	315	516	472	2 x 300	10
19	300	560	388	3 x 300	8,6
20	328	506	530	2 x 500	8,0

Продолжение таблицы 1

Вариант	U_2 , кВ	P_2 , МВт	L , км	$P_{Г}$, МВт	T_J , с
21	330	600	474	2 x 500	6,0
22	340	580	400	2 x 500	6,5
23	350	590	360	3 x 300	9,0
24	336	470	365	2 x 300	11,0
25	330	563	420	3 x 300	12,0
26	305	480	410	2 x 500	7,0
27	310	500	380	3 x 500	5,5
28	480	800	580	3 x 500	8,0
29	506	750	450	4 x 300	7,5
30	312	512	326	3 x 300	7,2
31	306	380	333	2 x 500	6,0
32	330	630	270	2 x 500	7,0
33	520	860	370	3 x 500	6,8
34	315	545	380	3 x 300	10
35	320	484	510	2 x 300	10
36	242	372	320	2 x 300	12
37	516	730	400	3 x 500	7,0
38	342	460	600	2 x 500	5,0
39	330	420	380	2 x 300	10,0
40	242	320	270	2 x 300	12
41	530	700	516	3 x 500	8,0
42	490	650	370	2 x 500	7,0
43	308	516	388	2 x 500	8,0
44	330	570	410	3 x 300	7,5
45	316	390	400	2 x 500	7,2
46	320	372	400	3 x 500	5,5
47	515	663	350	2 x 500	6,2
48	483	630	470	3 x 500	5,0
49	500	800	610	3 x 500	6,5
50	506	675	460	2 x 500	8,0
51	340	480	460	3 x 300	7,4
52	506	870	460	2 x 500	6,8
53	328	450	390	3 x 300	9,0
54	238	300	320	2 x 300	6,6
55	325	550	400	3 x 300	7,0
56	310	520	340	2 x 500	5,45
57	315	487	304	2 x 500	6,7
58	330	525	470	3 x 300	8,6
59	490	900	580	3 x 500	7,4
60	353	725	345	3 x 500	6,8
61	346	600	308	2 x 500	7,0
62	330	570	375	3 x 300	5,0
63	240	210	180	2 x 300	5,5
64	515	750	500	4 x 300	7,6

Окончание таблицы 1

Вариант	U_2 , кВ	P_2 , МВт	L , км	$P_{Г}$, МВт	T_J , с
65	500	700	450	4 x 300	6,0
66	325	540	356	3 x 300	5,8
67	242	286	204	2 x 300	5,6
68	500	800	450	2 x 500	6,7
69	338	450	390	3 x 300	7,2
70	330	400	420	2 x 500	6,7
71	340	450	400	3 x 300	9,0
72	505	780	400	2 x 500	6,6
73	333	680	300	3 x 300	6,45
74	326	620	320	2 x 300	6,8
75	312	505	300	2 x 500	5,5
76	230	350	320	3 x 300	6,0
77	485	830	600	3 x 500	7,0
78	336	590	270	4 x 300	6,6
79	512	840	510	4 x 300	7,2
80	526	605	620	3 x 500	6,8
81	320	380	240	3 x 300	4,0
82	306	500	200	4 x 300	3,0
83	320	350	340	3 x 300	7,0
84	235	265	200	2 x 300	5,0
85	335	650	370	2 x 500	6,0
86	314	425	400	2 x 500	6,0
87	480	860	540	3 x 500	6,3
88	500	800	460	3 x 500	5,8
89	495	780	430	3 x 500	5,6
90	319	510	330	2 x 500	5,0
91	316	465	310	2 x 500	6,2
92	490	750	580	3 x 500	7,2
93	342	450	350	3 x 300	7,6
94	320	600	300	2 x 300	6,0
95	315	580	340	2 x 300	6,6
96	235	250	220	2 x 300	5,5
97	242	220	250	2 x 300	4,8
98	328	564	246	2 x 500	4,6
99	310	400	380	2 x 500	6,2
100	340	365	380	2 x 500	7,0

УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Все расчёты следует проводить в системе относительных единиц, при этом удобно задаться следующими базисными условиями: $S_6 = 1000 \text{ МВА}$, $U_6 = U_2$.

Пункт 1

Предварительно следует составить схему замещения, схема, составленная с соблюдением всех допущений, представлена на рис. 2.

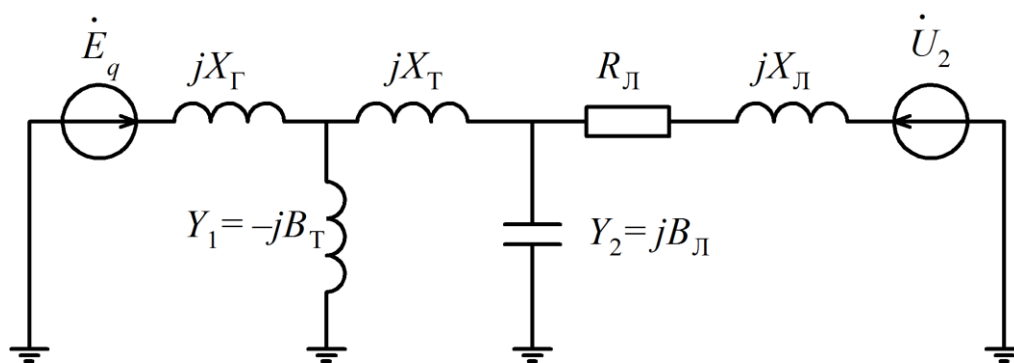


Рис. 2

здесь B_L – половина ёмкостной проводимости линий,
 B_T – проводимость ветви намагничивания трансформатора.

Для определения параметров схемы замещения системы необходимо выбрать сечение линий электропередач по экономической плотности тока, не забыв проверить его по условию недопущения короны. Следует иметь в виду, что при номинальном напряжении 330 кВ провод в фазе расщепляется на два, а при номинальном напряжении 500 кВ – на три проводника.

Сопротивления генератора, трансформатора и проводимость ветви намагничивания трансформатора в относительных единицах с учётом числа блоков станции (n) определяются по выражениям:

$$X_G = x_d \cdot \frac{S_6}{n \cdot S_{HT}}; \quad X_T = \frac{U_{k,\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{n \cdot S_{HT}}; \quad B_T = \frac{i_{\mu,\%}}{100} \cdot \frac{n \cdot S_{HT}}{S_6}.$$

Активное и реактивное сопротивления и ёмкостная проводимость линии с учётом двух параллельно работающих линий и того факта, что часть ёмкостной проводимости (половина), подключенная к шинам источника бесконечной мощности, может быть исключена из схемы замещения, определяются как:

$$R_L = \frac{1}{2} r_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_6^2}; \quad X_L = \frac{1}{2} x_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_6^2}; \quad B_L = 2 \cdot \frac{1}{2} b_0 \cdot L \cdot \frac{U_6^2}{S_6},$$

где L – длина линии.

Эквивалентная схема замещения может быть представлена последовательным соединением двух четырехполюсников Т-образного (генератор и трансформатор) и Г-образного (воздушная линия).

Постоянные каждого четырехполюсника определяются следующим образом:

$$\dot{A} = 1 + \dot{Z}_1 \dot{Y}, \quad \dot{C} = \dot{Y}, \quad \dot{B} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 \dot{Y}, \quad \dot{D} = 1 + \dot{Z}_2 \dot{Y}.$$

где \dot{Z}_1 – сопротивление от начала четырехполюсника до точки присоединения проводимости,

\dot{Z}_2 – сопротивление от точки присоединения проводимости до конца четырехполюсника.

Постоянные эквивалентного четырехполюсника определяются по следующим выражениям:

$$\dot{A}_0 = \dot{A}_1 \dot{A}_2 + \dot{B}_1 \dot{C}_2, \quad \dot{B}_0 = \dot{A}_1 \dot{B}_2 + \dot{B}_1 \dot{D}_2, \quad \dot{C}_0 = \dot{C}_1 \dot{A}_2 + \dot{D}_1 \dot{C}_2, \quad \dot{D}_0 = \dot{D}_1 \dot{D}_2 + \dot{C}_1 \dot{B}_2.$$

Не забудьте убедиться, что $\dot{A}_0 \dot{D}_0 - \dot{B}_0 \dot{C}_0 = 1$,

Для системы с эквивалентными постоянными $\dot{A}_0, \dot{B}_0, \dot{C}_0, \dot{D}_0$ уравнения для токов и напряжений будут представлены в виде:

$$\begin{cases} \dot{E}_q = \dot{A}_0 \dot{U}_2 + \dot{B}_0 \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{C}_0 \dot{U}_2 + \dot{D}_0 \dot{I}_2. \end{cases}$$

Решая эту систему относительно токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , получаем:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_q - \dot{A}_0 \dot{U}_2}{\dot{B}_0}; \quad \dot{I}_1 = \frac{-\dot{U}_2 + \dot{D}_0 \dot{E}_q}{\dot{E}_q}.$$

Тогда комплексы полных мощностей начала и конца передачи определяются выражениями:

$$\dot{S}_1 = \dot{E}_q \cdot \dot{I}_1^* = \frac{-\dot{E}_q U_2^* + D_0 \dot{E}_q^*}{B_0}; \quad \dot{S}_2 = \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2^* = \frac{E_q \dot{U}_2^* + A_0 \dot{U}_2^2}{B_0}.$$

При построении круговых диаграмм вектор напряжения \dot{U}_2 в конце передачи удобно совместить с действительной осью комплексной плоскости, т.е. $\dot{U}_2 = U_2$. Тогда ЭДС генератора будет опережать напряжение на угол нагрузки δ , т.е. $\dot{E}_q = E_q e^{j\delta}$.

Таким образом, выражения для мощностей начала и конца системы представляют собой сумму двух векторов: для мощности в начале системы

первый вектор $\frac{D_0 \dot{E}_q^2}{B_0}$ и второй $\frac{-\dot{E}_q U_2}{B_0}$. Их геометрическая сумма и дает

комплекс мощности \dot{S}_1 в начале передачи.

Комплекс мощности \dot{S}_2 в конце передачи состоит из суммы векторов

$$\frac{-A_0 U_2^2}{B_0} \text{ и } \frac{E_q U_2}{B_0}.$$

Действительные части этих комплексов представляют собой соответственно активные мощности P_1 и P_2 , а мнимые – реактивные Q_1 и Q_2 . При постоянстве ЭДС E_q в начале и напряжения U_2 в конце системы единственной переменной

величиной является угол δ . В этом случае комплексы $\frac{D_0 \dot{E}_q^2}{B_0}$ и $\frac{-A_0 U_2^2}{B_0}$ остаются

неизменными по величине и по фазе, а комплексы $\frac{-\dot{E}_q U_2}{B_0}$ и $\frac{E_q U_2}{B_0}$, оставаясь

неизменными по величине, изменяют угол поворота с изменением угла δ . При

$\delta = 0$ они занимают положение $\frac{-\dot{E}_q U_2}{B_0} = \frac{-E_q U_2}{B_0} e^{j\psi_{B_0}}$, где ψ_{B_0} – аргумент

комплекса \dot{B}_0 . При угле δ отличном от нуля, они поворачиваются на этот угол: для начала системы – против часовой стрелки и для конца системы – по часовой стрелке (рис. 3).

Из рисунка видно, что при этих условиях концы комплексов полных мощностей начала и конца передачи перемещаются по окружностям, центры которых определяются радиус-векторами:

– для мощности в начале системы

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{D_0}{B_0} E_q^2 e^{j(\psi_{B_0} - \psi_{D_0})},$$

– для мощности в конце системы

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{-A_0}{B_0} U_2^2 e^{j(\psi_{B_0} - \psi_{A_0})}.$$

Радиусы обеих окружностей одинаковы:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho = \frac{E_q U_2}{B_0}.$$

Отсчет углов δ производится от линии, проведенной из центра окружностей под углом ψ_{B_0} к горизонтали.

Пример построения круговой диаграммы при $\delta = \delta_0$, где δ_0 – значение угла δ в установившемся (исходном) режиме работы, приведён на рис. 3.

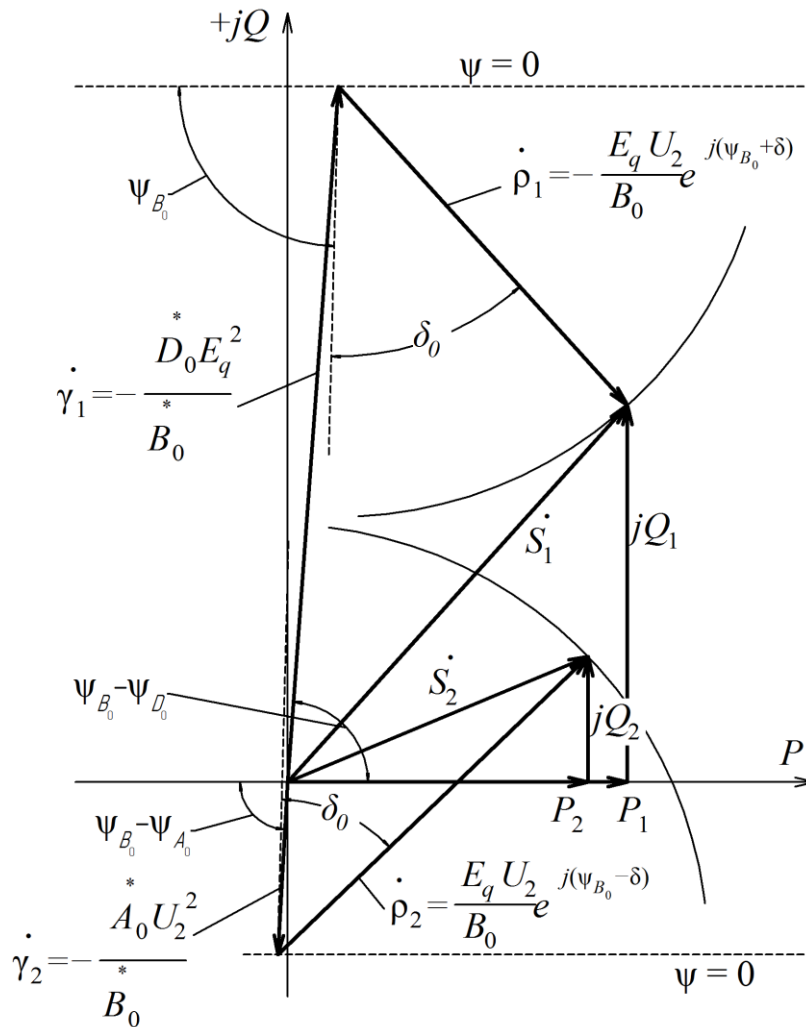


Рис. 3

Активные мощности в начале и в конце передачи (угловые характеристики) при постоянстве ЭДС E_q определяются по выражениям

$$P_1 = E_q^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E_q U_2 \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}),$$

$$P_2 = -U_2^2 \cdot y_{22} \cdot \sin \alpha_{22} + E_q U_2 \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta + \alpha_{12}).$$

При нахождении собственных и взаимных проводимостей системы следует помнить, что они определяются соотношениями постоянных четырехполосника:

$$\dot{Y}_{11} = \frac{\dot{D}_0}{\dot{B}_0} = \frac{D_0}{B_0} e^{j\psi_{11}} = y_{11} e^{j\psi_{11}}; \quad \dot{Y}_{22} = \frac{\dot{A}_0}{\dot{B}_0} = \frac{A_0}{B_0} e^{j\psi_{22}} = y_{22} e^{j\psi_{22}};$$

$$\dot{Y}_{12} = \frac{1}{\dot{B}_0} = \frac{1}{B_0} e^{j\psi_{12}} = y_{12} e^{j\psi_{12}}.$$

Значения углов, входящих в выражения для угловых характеристик, определяются по выражению: $\alpha_{ij} = 90^\circ + \psi_{ij}$, где $ij = 11; 22; 12$.

Пункт 2

Схема замещения электроэнергетической системы с учётом заданных допущений представлена на рисунке 4.

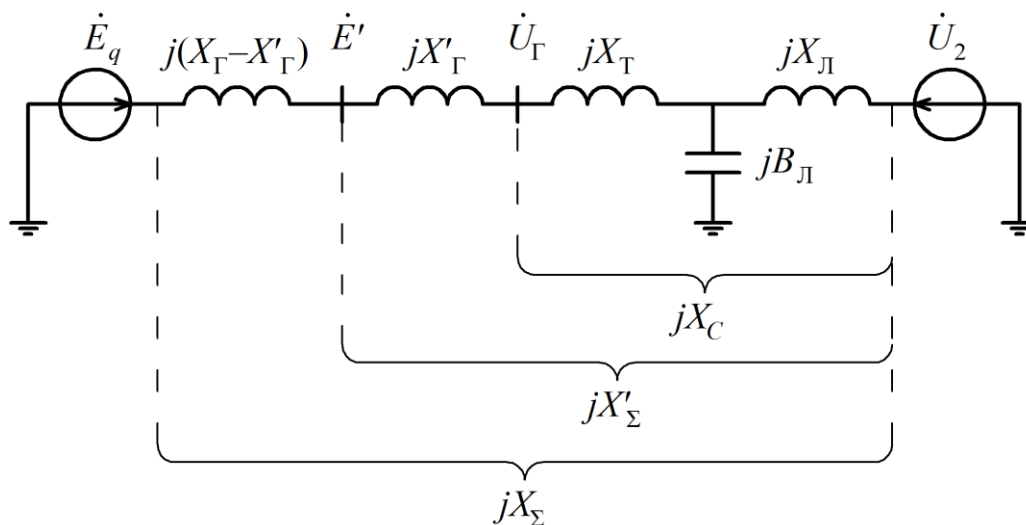


Рис. 4

Помните, что здесь все сопротивления должны быть выражены в относительных единицах и приведены к базисным условиям!

Результатирующие сопротивления схем (X_Σ , X'_Σ , X_C) допускается определить как

$$X_1 + X_2 - X_1 X_2 B_{\text{Л}},$$

где X_1 – сопротивление от начала схемы до точки включения $B_{\text{Л}}$,

X_2 – сопротивление от точки включения $B_{\text{Л}}$ до конца схемы.

Значения ЭДС \dot{E}_q , \dot{E}' и напряжения генератора $\dot{U}_Г$ следует определять, как сумму напряжения в конце передачи и падения напряжения в результирующем сопротивлении от протекания тока нагрузки.

При построении векторной диаграммы следует показать вектора тока нагрузки, напряжений \dot{U}_2 , $\dot{U}_Г$, ЭДС \dot{E}_q , \dot{E}' , углы между ними, а также проекции векторов $\dot{U}_Г$ и \dot{E}' на ось q .

При отсутствии у генератора АРН (постоянство ЭДС \dot{E}_q) выражение характеристики мощности имеет вид

$$P_{E_q} = \frac{E_q U_2}{X_\Sigma} \sin \delta.$$

Характеристики мощности при наличии АРН пропорционального действия (постоянство ЭДС \dot{E}'_q) и АРН сильного действия (постоянство напряжения $\dot{U}_{Гq}$) описываются выражениями:

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U_2}{X'_\Sigma} \sin \delta - \frac{U_2^2}{2} \cdot \frac{X_\Gamma - X'_\Gamma}{X_\Sigma X'_\Sigma} \sin(2\delta),$$

$$P_{U_{\Gamma q}} = \frac{U_{\Gamma q} U_2}{X_C} \sin \delta - \frac{U_2^2}{2} \cdot \frac{X_\Gamma}{X_\Sigma X_C} \sin(2\delta).$$

Все три характеристики следует строить в одной системе координат.

Пункт 3

При выполнении данного пункта следует определить значения углов, при которых наблюдаются максимумы характеристик в пункте 2, значения этих максимумов определяется по выражениям из пункта 2, а коэффициентов запаса статической устойчивости по выражению $K_{cy} = \frac{P_{max} - P_0}{P_0}$.

Пункт 4

Для получения искомой зависимости расчёт коэффициента запаса статической устойчивости следует проводить для ряда значений $\cos \varphi$ в следующей последовательности:

1. Для заданного значения $\cos \varphi$ определить ток $I_2 e^{\pm j\varphi}$ (в показателе степени знак «+» при ёмкостной нагрузке, «-» при индуктивной).
2. Определить значение ЭДС генератора (как в пункте 1 или 2).
3. Определить предел передаваемой мощности (как в пункте 3).
4. Определить коэффициент запаса статической устойчивости (как в пункте 3).

Пункт 5

Из анализа пункта 5 задания следует, что схема замещения электроэнергетической системы при выполнении данного пункта соответствует схеме, приведённой на рисунке 3 при постоянстве ЭДС E'_q .

Проверка статической устойчивости системы без учёта действия АРВ заключается в исследовании уравнения движения ротора:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_0 - P_m \sin \delta,$$

которое после линеаризации принимает вид

$$T_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_d \frac{d\Delta \delta}{dt} + C_1 \Delta \delta = 0,$$

где C_1 – синхронизирующая мощность, определяемая выражением

$$C_1 = \frac{E'_q U_2}{X_\Sigma} \cos \delta_0;$$

T_j – постоянная инерции ротора [с] (её следует привести к базисным условиям $T_{j(б)} = T_{j(ном)} \frac{n S_{НГ}}{S_б}$).

Характеристическое уравнение:

$$T_j p^2 + P_d p + C_1 = 0.$$

При отсутствии демпферного момента уравнение движения ротора упрощается, и характеристическое уравнение принимает вид

$$T_j p^2 + C_1 = 0.$$

Корни уравнения при $0^0 \leq \delta_0 \leq 90^0$ будут мнимыми числами

$$p_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{C_1 \cdot 2\pi f_0}{T_j}} = \pm j\omega_1,$$

что указывает на колебательный характер движения ротора с неизменной амплитудой.

Отсюда могут быть определены (если требуется) собственная частота и период колебаний ротора эквивалентного генератора передающей станции $f = \omega_1 / 2\pi$ [Гц], $T = 1/f$ [с].

Относительное движение ротора (решение линеаризованного уравнения) имеет вид

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos(\omega_1 t),$$

где $\Delta\delta_0$ – начальное отклонение ротора на один градус от положения установившегося режима ($\Delta\delta_0 = 1$).

При $\delta > 90^0$ синхронизирующая мощность будет отрицательная и корни характеристического уравнения будут действительными числами, одно из которых больше нуля, что соответствует неустойчивому состоянию. Решение уравнения в этом случае имеет вид

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{2} e^{p_1 t} + e^{p_2 t}.$$

При учёте демпферного момента (не забудьте привести его к базисным условиям) решение линеаризованного уравнения при малых углах δ имеет вид:

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 e^{\alpha t} \cos(\omega_1 t)$$

где α и ω_1 – действительная и мнимая части корней характеристического уравнения ($p_{1,2} = \alpha \pm j\omega_1$).

$$p_{1,2} = -\frac{P_d}{2T_j} \pm \sqrt{\left(\frac{P_d}{2T_j}\right)^2 - \frac{C_1 \cdot 2\pi f_0}{T_j}}.$$

Увеличение угла нагрузки генератора δ будет сопровождаться уменьшением величины синхронизирующей мощности, и при определенных условиях подкоренное выражение обращается в нуль. Угол δ , при котором наступает это равенство, носит название граничного угла и может быть подсчитан по

$$\text{формуле } \delta_{\text{гр}} = \arccos \frac{P_d^2 X_\Sigma}{2\pi f_0 \cdot 4E_q U_2 T_j}.$$

При значениях угла $\delta < \delta_{гр}$ процесс носит колебательный характер, а в диапазоне $\delta_{гр} < \delta < 90^0$ процесс будет носить аperiodический характер, т.к. в этом случае оба корня характеристического уравнения выражаются отрицательными действительными числами.

При $\delta > \delta_{гр}$ решение уравнения имеет вид

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \frac{p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}}{p_1 - p_2}.$$

Пункт 6

Расчёт динамической устойчивости производится при условии сохранения неизменной величины переходной ЭДС E'_q у генераторов станции. Для проверки системы на динамическую устойчивость необходимо на одном графике построить три угловых характеристики передачи, соответствующие нормальному (I), аварийному (II) и послеаварийному (III) режимам работы. При построении характеристик допускается не учитывать составляющую мощности двойной частоты. Амплитуды указанных характеристик определяются по схемам замещения системы для каждого из указанных режимов работы (рис. 5, 6 и 7).

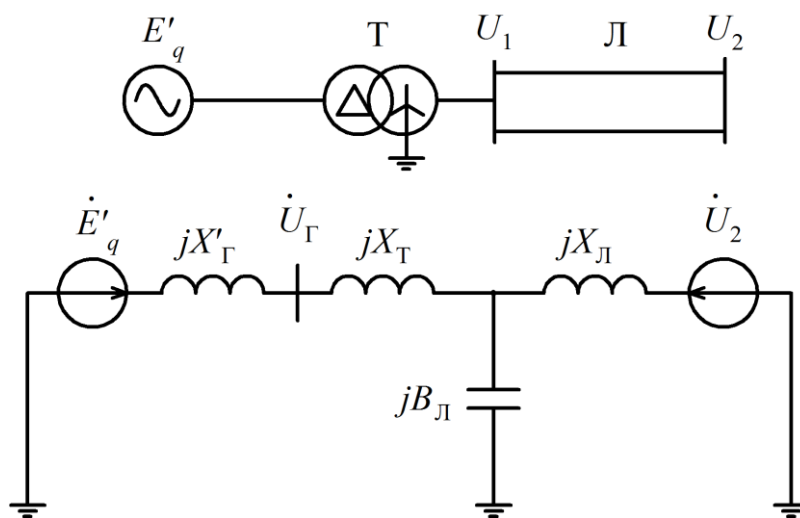


Рис. 5. Схема сети и схема замещения в нормальном режиме работы

В аварийном режиме (во время существования КЗ) в схему параллельно ёмкостной проводимости включается дополнительный шунт X_K , величина сопротивления которого зависит от вида КЗ и равна величине параметра $X_{\Delta}^{(n)}$. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности для трёхфазного КЗ $X_{\Delta}^{(3)} = 0$, для двухфазного – $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma}$, для однофазного – $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$ и для двухфазного на землю – $X_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$.

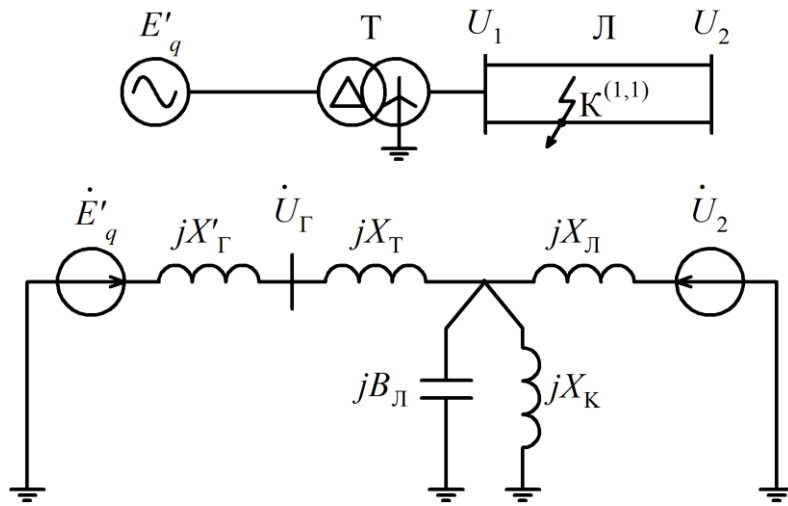


Рис. 6. Схема сети и схема замещения в аварийном режиме работы

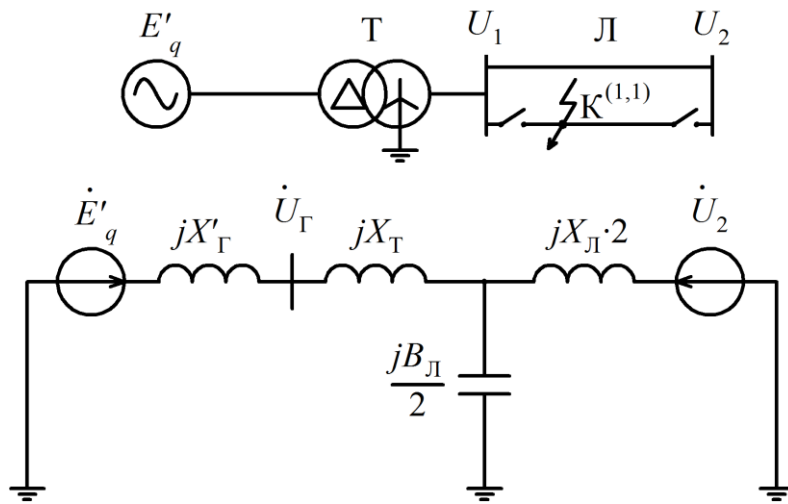


Рис. 7. Схема сети и схема замещения в послеаварийном режиме работы

Величины результирующих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей определяются из соответствующих схем замещения системы (рис. 8, 9).

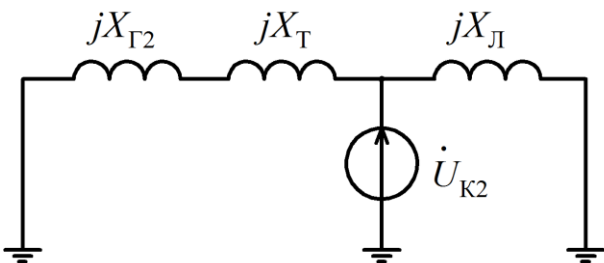


Рис. 8. Схема замещения системы обратной последовательности

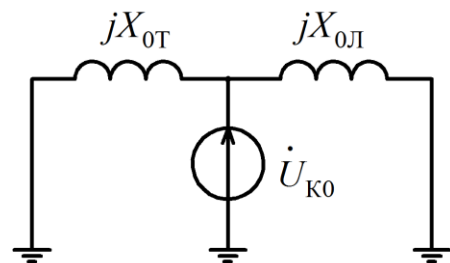


Рис. 9. Схема замещения системы нулевой последовательности

Сопротивление генератора обратной последовательности подсчитывается по формуле:

$$X_{\Gamma 2} = \frac{X''_d S_{\delta}}{n S_{\text{НГ}}},$$

где X''_d – сверхпереходная реактивность генератора, может быть принята равной 0,2 для генераторов всех типов.

Сопротивление нулевой последовательности линии электропередач в значительной степени отличается от сопротивления прямой последовательности и колеблется в весьма широких пределах $(2...5,5) \cdot X_{\text{Л}}$ в зависимости от конструктивного исполнения линии.

Суммарные сопротивления, определяющие амплитуды угловых характеристик для каждого из режимов, определяются по схемам замещения системы (рис. 5, 6, 7):

$$X_{\Sigma}^{(I)} = X'_{\Gamma} + X_{\text{T}} + X_{\text{Л}} - (X'_{\Gamma} + X_{\text{T}})X_{\text{Л}}B_{\text{Л}},$$

$$X_{\Sigma}^{(II)} = X'_{\Gamma} + X_{\text{T}} + X_{\text{Л}} - (X'_{\Gamma} + X_{\text{T}})X_{\text{Л}}(B_{\text{Л}} - B_{\text{К}}),$$

$$X_{\Sigma}^{(III)} = X'_{\Gamma} + X_{\text{T}} + 2X_{\text{Л}} - (X'_{\Gamma} + X_{\text{T}})X_{\text{Л}}B_{\text{Л}},$$

где $B_{\text{К}} = 1/X_{\text{К}}$ – проводимость шунта короткого замыкания.

Используя правило площадей (см. рис. 10), можно найти угол предельного отключения аварии $\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}}$, величина которого определяется из условия равенства площади ускорения F_{abcd} площадке торможения F_{defd} .

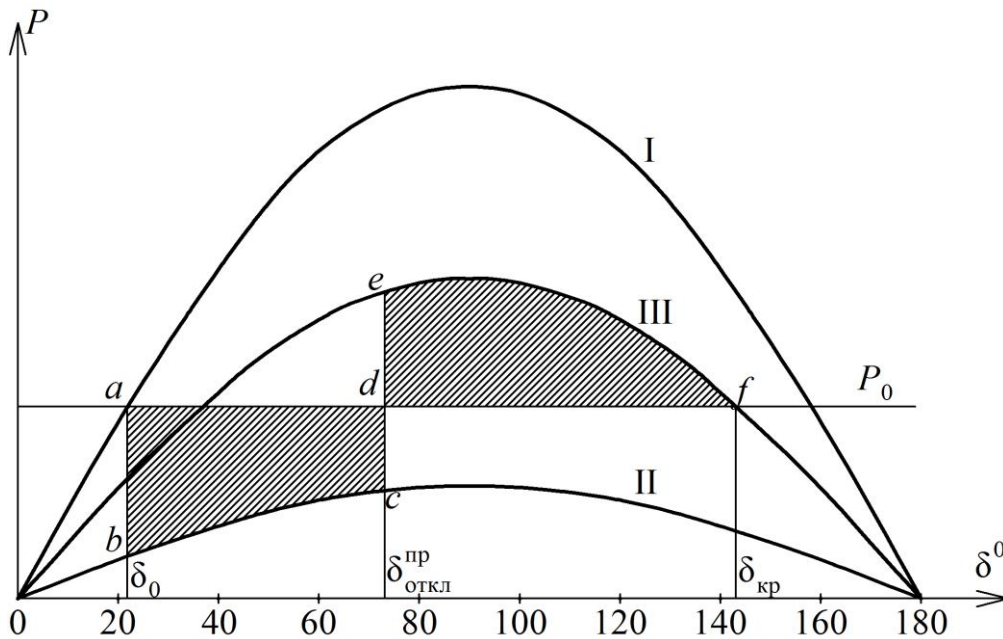


Рис. 10. Определение угла предельного отключения

После приравнивания интегралов и решения полученного уравнения имеем

$$\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = \arccos \frac{P_0 \delta_{\text{кр}} - \delta_0 - P_m^{\text{II}} \cos \delta_0 + P_m^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_m^{\text{III}} - P_m^{\text{II}}},$$

где величины начального и критического угла можно найти из выражений

$$\delta_0 = \frac{P_0}{P_m^I}; \quad \delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_m^{III}}.$$

Зная предельный угол отключения аварии, можно определить максимально допустимое время отключения КЗ (время предельного отключения). Для чего будем использовать метод последовательных интервалов.

Сущность этого метода заключается в следующем.

Весь процесс качания машины разбивается на ряд небольших и равных между собой интервалов времени. Обычно продолжительность интервала принимается равной $\Delta t = 0,05$ с, и для каждого из этих интервалов последовательно вычисляется приближенное значение приращения угла $\Delta\delta$.

Возникающий в момент короткого замыкания избыток мощности ΔP сообщает ротору некоторое ускорение α . Для достаточно малого интервала времени Δt можно допустить, что избыток мощности в течение этого периода остается неизменным. Так, на первом интервале он соответствует участку ab (см. рис. 10) $\Delta P_{(0)} = P_0 - P_m^{II} \sin \delta_0$. Затем по формулам равноускоренного движения нетрудно вычислить приращение скорости машины $\Delta v_{(1)}$ и угла $\Delta\delta_{(1)}$ в течение первого интервала:

$$\Delta v_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t, \quad \Delta\delta_{(1)} = \frac{\alpha_{(0)} \Delta t^2}{2}.$$

Величина ускорения $\alpha_{(0)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j}$ и, следовательно, приращение угла

$$\Delta\delta_{(1)} = 360f \frac{\Delta t^2 \cdot \Delta P_{(0)}}{2T_j},$$

здесь умножение на коэффициент $360f$ произведено для того, чтобы выразить угол в градусах, а время – в секундах.

Обозначив через $K = 360f \frac{\Delta t^2}{T_j}$, получим

$$\Delta\delta_{(1)} = K \frac{\Delta P_{(0)}}{2}.$$

Зная приращение угла в первом интервале, можно найти абсолютное значение угла в конце этого интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}.$$

Для нового значения угла $\delta_{(1)}$ можно определить величину избытка мощности $\Delta P_{(1)}$ в начале второго интервала времени по формуле

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_m^{II} \sin \delta_{(1)}.$$

Тогда приращение угла на втором интервале

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + K \Delta P_{(1)}.$$

Теперь можно найти угол в конце второго – в начале третьего интервалов $\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)}$, вычислить избыток мощности $\Delta P_{(2)}$ и приращение угла $\Delta\delta_{(3)}$:

$$\Delta\delta_{(3)} = \Delta\delta_{(2)} + K\Delta P_{(2)},$$

и т.д.

Таким образом, для произвольного i -го интервала приращение угла определяется выражением

$$\Delta\delta_{(i)} = \Delta\delta_{(i-1)} + K\Delta P_{(i-1)}.$$

Особенности расчёта наблюдаются на том интервале, на котором ожидается превышение значения $\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}}$. В начале этого интервала (пусть это будет интервал под номером n) следует предусмотреть «отключение» повреждённого участка цепи. Согласно рис. 10 на этом интервале будут действовать два значения избыточной мощности (участки dc и ed)

$$\Delta P'_{(n-1)} = P_{(0)} - P_m^{\text{II}} \sin \delta_{(n-1)} \quad \text{и} \quad \Delta P''_{(n-1)} = P_{(0)} - P_m^{\text{III}} \sin \delta_{(n-1)}.$$

Суммарное значение избытка мощности равно

$$\Delta P_{(n-1)} = \frac{\Delta P'_{(n-1)} + \Delta P''_{(n-1)}}{2}.$$

Приращение угла на интервале n

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K\Delta P_{(n-1)}.$$

Угол в конце интервала n

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)}.$$

На последующих интервалах расчёт проводится как, например, для интервала 2 или 3, с тем отличием, что в выражении для определения величины избыточной мощности ΔP участвует мощность P_m^{III} .

Расчёты следует закончить тогда, когда убедитесь в том, что система динамически устойчива.

Для определения предельного времени отключения аварии строится зависимость угла δ от времени (см. рис. 11).

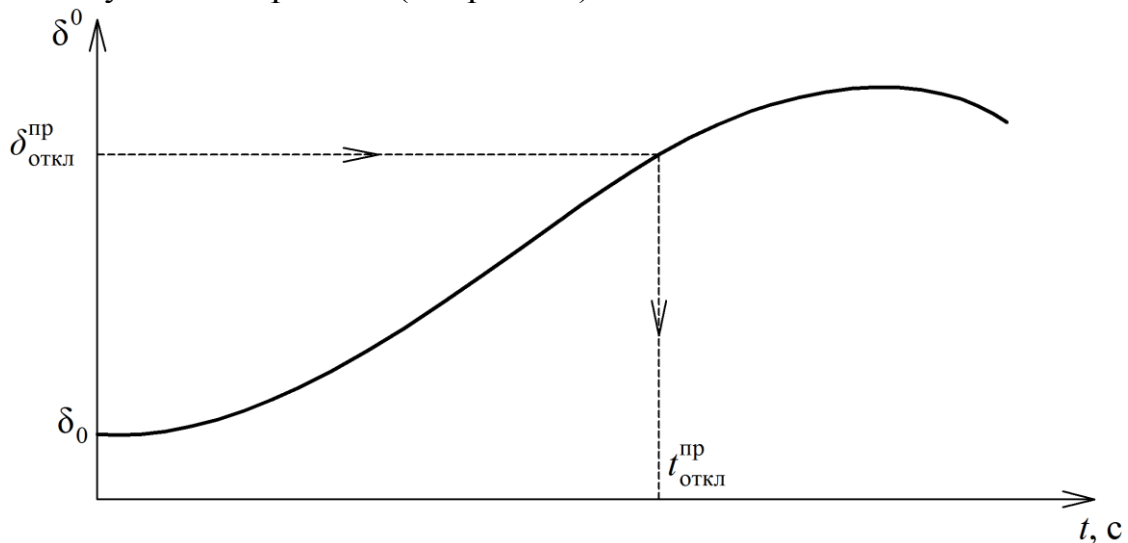


Рис. 11

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Курсовую работу следует оформлять в соответствии с СТО ЮУрГУ 04–2008 [11].

ПЕРЕЧЕНЬ ОБЯЗАТЕЛЬНОГО ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Перечень обязательного графического материала, который должен быть представлен в пояснительной записке, приведён в таблице 2.

Таблица 2

№ пункта	Рисунки
1	1) схема замещения сети; 2) круговая диаграмма, на которой показаны вектора мощностей при $\delta = \delta_0$; 3) угловые характеристики начала и конца передачи;
2	4) схема замещения сети; 5) векторная диаграмма передачи; 6) угловые характеристики передачи;
4	7) зависимость коэффициента запаса статической устойчивости от коэффициента мощности нагрузки;
5	8) схема замещения для анализа статической устойчивости системы; 9) семейство зависимостей изменения угла δ от времени при отсутствии демпферного момента (в одной системе координат); 10) семейство зависимостей изменения угла δ от времени при наличии демпферного момента (в одной системе координат);
6	11) схемы сети для исходного, аварийного и послеаварийного режимов; 12) схемы замещения для перечисленных режимов; 13) схемы замещения обратной и нулевой последовательностей; 14) рисунок, поясняющий определение угла предельного отключения на основе правила площадей; 15) зависимость угла δ от времени, по которой произведено определение предельного времени отключения аварии, а также доказывающий, что система, при найденном угле предельного отключения, динамически устойчива.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Что такое электромеханические переходные процессы?
2. Что такое режим системы?
3. Что такое параметры режима, привести примеры.
4. Что такое параметры системы, привести примеры.
5. Какой параметр связывает электромагнитные и механические процессы в единые электромеханические?

6. Может ли угол δ меняться мгновенно?
7. Что понимают под установившимся режимом работы?
8. Что понимают под переходным режимом работы?
9. Что такое статическая устойчивость?
10. Что такое динамическая устойчивость?
11. Записать выражение характеристики мощности простейшей системы при не учёте активных сопротивлений.
12. Сформулировать критерий статической устойчивости.
13. Записать выражение для определения синхронизирующей мощности.
14. Что такое относительная скорость движения ротора?
15. От чего зависит амплитуда характеристики мощности электропередачи?
16. При каком условии характеристики мощности начала и конца передачи совпадают?
17. Почему при получении характеристик мощности сложной электропередачи используется теория четырехполюсников?
18. Какие «опыты» позволяют установить физический смысл постоянных четырехполюсников?
19. Как меняются характеристики мощности начала и конца передачи при увеличении активных сопротивлений схемы?
20. Что такое статическая характеристика мощности?
21. Что такое динамическая характеристика мощности?
22. Объяснить математический смысл несинусоидальности динамической характеристики мощности.
23. Объяснить физический смысл несинусоидальности динамической характеристики мощности.
24. Записать взаимосвязь между углом, выраженном в «электрических» и углом, выраженном в «геометрических» градусах.
25. Показать взаимосвязь между «электрической» и «механической» скоростью ротора в относительных единицах.
26. Показать взаимосвязь между мощностью и вращающим моментом ротора в относительных единицах.
27. Записать выражения для определения ускорения ротора в относительных единицах.
28. Почему при анализе статической устойчивости необходимо проводить линеаризацию уравнения движения ротора?
29. В чём суть метода линеаризации при применении его для анализа статической устойчивости?
30. Что является результатом решения уравнения движения ротора.
31. Как зависит статическая устойчивость системы от положения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости?
32. Сформулировать правило Ляпунова.
33. Как влияет характер корней характеристического уравнения на характер относительного движения ротора при малых возмущениях?

34. Корни характеристического уравнения движения ротора в одном случае содержат действительную и мнимую части, в другом только мнимые. В чём разница характера относительного движения ротора в этих случаях.

35. Как влияет наличие и величина демпферного момента на характер относительного движения ротора при малых возмущениях?

36. Как влияет величина синхронизирующей мощности на характер относительного движения ротора при малых возмущениях?

37. Как влияет величина угла δ_0 на характер относительного движения ротора при малых возмущениях?

38. Сформулировать допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости.

39. Сформулировать правило площадей.

40. Сформулировать практический критерий динамической устойчивости.

41. Докажите, что на этапе ускорения ротора наблюдается его ускорение, а на этапе торможения – торможение.

42. Что такое угол предельного отключения?

43. Сколько схем замещения, и каких составляется для определения угла предельного отключения?

44. Как изменится угол предельного отключения при трёхфазном КЗ по сравнению с однофазным, почему?

45. Какое правило используется при определении величины шунта сопротивления, включаемого между точкой КЗ и землей в схеме аварийного режима при анализе динамической устойчивости?

46. В какой последовательности (сверху вниз) будут располагаться характеристики мощности для аварийного режима работы системы в зависимости от вида КЗ?

47. Сравните выдержки времени защиты при отключении КЗ в линии электропередач для случаев: 1 – при отсутствии АПВ линии; 2 – при наличии АПВ линии.

48. Как, зная угол предельного отключения, определить время предельного отключения?

49. В чём суть метода последовательных интервалов?

50. Как при анализе динамической устойчивости с использованием метода последовательных интервалов доказывается устойчивость системы?

51. Почему при построении зависимости угла δ от времени при использовании метода последовательных интервалов максимальное расчётное значение угла меньше критического?

52. Что такое действительный предел мощности?

53. Почему действительный предел мощности меньше идеального?

54. От чего зависит степень снижения напряжения на шинах приёмной системы?

55. Что такое статические характеристики нагрузки?

56. Что такое регулировочный эффект нагрузки?

57. Чему равен регулировочный эффект нагрузки активного сопротивления? Докажите это.

58. Чему равен регулировочный эффект нагрузки индуктивного сопротивления? Докажите это.

59. Записать критерий устойчивости асинхронного двигателя.

60. Как влияет внутреннее сопротивление системы на устойчивость эквивалентного асинхронного двигателя?

61. Каким может быть регулировочный эффект нагрузки по активной и реактивной мощности асинхронного двигателя?

62. Каким может быть регулировочный эффект нагрузки по активной и реактивной мощности синхронного двигателя?

63. Что является вторичным признаком устойчивости электроэнергетической системы?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
2. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов – М.: Энергия, 1964. – 704 с.
4. Переходные процессы в системах электроснабжения / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др.; под ред. В.Н. Винославского. – Киев: Высшая шк. Головное издательство, 1989. – 422 с.
5. Столбов, Ю.А. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие с примерами и иллюстрациями / Ю.А. Столбов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 380 с.
6. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 251 с.
7. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пиратов; под ред. И.П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.
8. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева – М.: Изд-во НЦЭНАС, 2002 – 152 с.
9. Ульянов, С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах / С.А. Ульянов – М.: Энергия, 1968. – 496 с.
10. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
11. СТО ЮУрГУ 04–2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРОГРАММА КУРСА.....	3
ЗАДАНИЕ.....	4
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ.....	5
УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	8
Пункт 1.....	8
Пункт 2.....	12
Пункт 3.....	13
Пункт 4.....	13
Пункт 5.....	13
Пункт 6.....	15
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.....	20
ПЕРЕЧЕНЬ ОБЯЗАТЕЛЬНОГО ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА.....	20
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	24